第40卷 第4期
2023年4月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 4
Apr. 2023

近35 a新疆天山巴音布鲁克草原退化程度评价

赵 剑[1,2,3]， 邓成军[4]， 李文利[4]， 赵 金[1]， 公延明[1,2]， 李凯辉[1,2]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐 830011；2. 中国科学院新疆生态与地理研究所巴音布鲁克草原生态系统研究站，新疆 巴音布鲁克 841314；3. 中国科学院大学，北京 100049；4. 新疆巴音郭楞蒙古自治州草原工作站，新疆 库尔勒 841000）

摘 要：植被覆盖度和生产力指标作为评价草原生态系统退化已有较多研究，各单一评价指标互相独立难以对不同草原退化程度进行综合评价。本研究以新疆天山中部巴音布鲁克草原为研究对象，提出了一种基于标准化处理分指标耦合的草原退化遥感评估方法。选取草原植被覆盖度、草层平均高度、总产草量3个分指标，通过主成分分析法确定分指标权重，并引入Min-Max标准化方法处理并构建综合评价指标草地退化指数（Grassland Degradation Index，GDI），最终通过Landsat影像反演以及草地退化指数变化率的合理分级评估了1986—2021年新疆天山巴音布鲁克草原的退化程度。结果表明：（1） GDI_g 与NDVI的相关性最好。（2）2021年巴音布鲁克草原未退化面积占总面积的比例为60.51 %；不同草地类型的草地退化程度有明显差异；空间分布上表现为由盆地向山地退化加重的趋势。（3）通过辐射配准方法可以将 GDI_{rs} 模型应用于其他年份，2000—2009年巴音布鲁克草原退化程度明显改善，2009—2021年草原退化程度轻微波动。研究结果将为指导巴音布鲁克草原退化程度的评价和保护草原生态系统提供一定的数据支撑和理论基础。

关键词：草原退化；Landsat影像；Min-Max标准化；草地退化指数；回归模型；巴音布鲁克草原

草原是我国陆地生态系统的重要组成部分，占国土面积的41.67%[1]，其中各类天然草地约有4×10^8 hm^2，可利用面积为3.9×10^8 hm^2，集中分布在中西部地区[2]。新疆是我国五大草原畜牧业省份之一，天然草地毛面积5.6×10^7 hm^2，可利用面积4.8×10^7 hm^2，位居全国第三位，草地面积约占新疆总面积的34.44%[3]。然而，受自然和人为因素影响，我国草原正发生不同程度的退化[1]。新疆天然草地已有85%出现不同程度的退化[4]，与20世纪60年代相比，巴音布鲁克草原草地植被覆盖度由原来89.4%下降到30%~50%[5]，巴音布鲁克草原退化面积达到30.48×10^4 hm^2，占草地总面积的19.61%[5]。2000年以来，我国实施了包括退牧还草和草原生态奖补机制在内的一系列重大生态工程[6-7]，重点进行退化草原修复治理工作。

草原幅员辽阔，仅采用野外调查手段不能满足大尺度评价要求，且监测周期长工作量大，因此3S技术被广泛应用到草地监测方面[8]。草原生态系统研究中，学者们大多选用植被指数、植被覆盖度、植被生产力等指标来评价草地状况。吴晓全等[9]利用CASA模型估算了新疆天山地区的植被净初级生产力的时空分布并分析其驱动因素，结果表明天山地区植被-净初级生产力空间上呈西高东低、由北向南递减的特征；针对草原退化或健康状况评价问题，杜自强等[10]选取植被覆盖度、牧草地上生物量和牧草可食率3个指标加权平均构建了草地退化指数，通过TM影像遥感监测黑河中上游草地1986—2003年的退化情况，结果表明草地退化加剧、局部改善、整体恶化的变化格局；赵玉婷等[11]基于“压力-状态-响应”（PSR）模型，从压力、状态、响应3个层面选取17个指标构建了甘南藏族自治州高寒牧区草地生态系统健康评价体系，并表明13 a来该地区高寒草地健康状况负向变化趋势明显；陆均等[12]通过CVOR指数研究表明，巴音布鲁克高寒草原生

收稿日期：2022-06-06； **修订日期：**2023-01-28
基金项目：第三次新疆科学考察项目（2022xjkk0401）；王宽诚教育基金会（中亚咸海生态与环境修复国际研究团队）
作者简介：赵剑（1997-），男，硕士研究生，主要从事草原生态遥感监测. E-mail: 715171198@qq.com
通讯作者：李凯辉. E-mail: likh@ms.xjb.ac.cn

态系统健康状况由2004年的一般病态逐渐恢复为2012年健康状态,且退化状况由强度退化恢复为中度退化;吴志丰等[13]探究了一种基于遥感的参照覆盖度提取及草地退化评价研究的方法,在一定程度上解决了目前大范围草地退化评估过程中面临的缺乏参照系统及遥感数据应用误区等问题;李霞等[14]选取盖度、总产量和可食草产量3个指标并结合GIS中的空间插值法反演甘肃省草地退化状况,结果显示甘肃省退化草原面积1.79×10^7 hm^2,占全省草原总面积的69.65%。草原退化程度反映在植被覆盖度、地上生物量、可食草比例、草地退化指示物种以及土壤有机质含量等指标的变化上,诸多研究对不同指标进行了分析,但退化表征指标复杂且受限于各种调查技术,各个分指标相互独立,综合评估指标的建立是面临的问题。

目前,对草原退化程度的分级方法种类繁多,各退化评价指标差异大且难统一,缺乏综合评价指标体系,通过计算分指标的权重值,实现不同指标的有机综合是提高草原监测精度的关键[15]。因此,本研究选取植被覆盖度、总产草量以及草层平均高度3个指标,并引入了Min-Max标准化方法对分指标进行处理,进一步构建草地退化指数(Grassland Degradation Index,GDI),以1986年野外调查数据作为未退化参照,通过中高分辨率的Landsat影像反演并计算得出GDI的变化率来表征草原退化情况,旨在建立草原退化遥感综合评估指标,解决草原退化大尺度监测效率低的问题,评估20世纪80年代以来巴音布鲁克草原的退化情况。

1　材料与方法

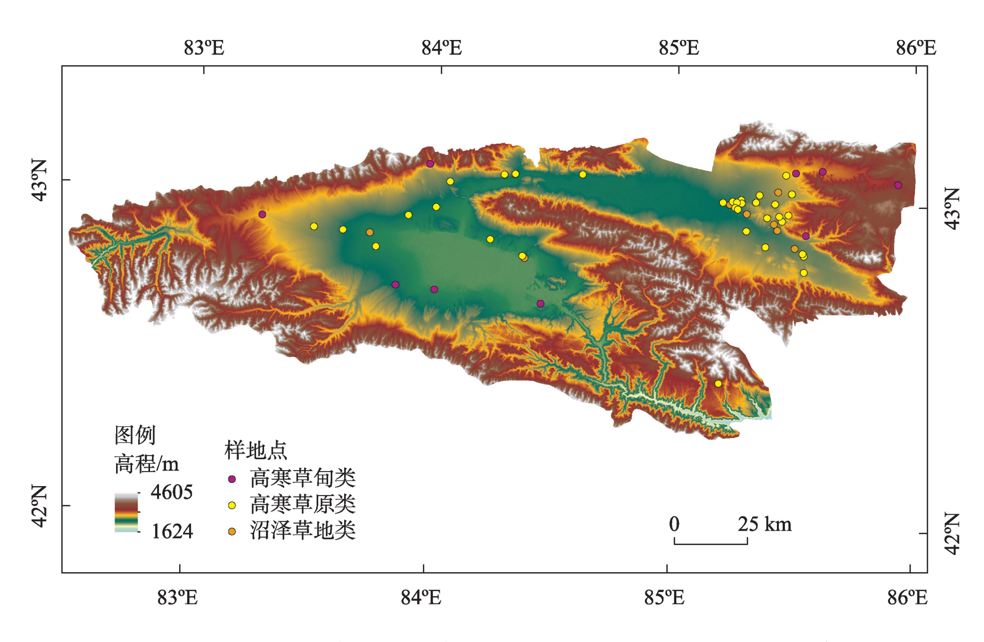
1.1　研究区概况

巴音布鲁克草原位于新疆维吾尔族自治区巴音郭楞蒙古自治州和静县西北天山南麓,东西长292 km,南北宽108 km,主要由大尤尔都斯盆地和小尤尔都斯盆地以及天山山脉中段组成,海拔为1624~4606 m。其气候为典型高寒气候类型,雨雪天气多,冬季漫长夏季短暂,年均气温-4.8 ℃,全年积雪日约137 d,积雪深度45 cm[16]。草地类型以沼泽类、高寒草甸类和高寒草原类为主,地表优势植物有线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*)、珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)、紫花针茅(*Stipa purpurea*)、寒生羊茅(*Festuca kryloviana*)等。

地面调查样地点数据共52个,其中建模集样点35个,验证集样点17个(图1)。

1.2　数据来源与处理

本文采用与研究相关的遥感数据和地面调查数据。其中20世纪80年代草原普查数据和2021年地面样地调查数据均来自于中国科学院巴音布鲁



注:底图采用自然资源部标准地图制作,审图号为GS(2019)3333号,对底图边界无修改。

图1　研究区位置及样地点位

Fig. 1　Location and sample points of the study area

克草原生态系统研究站;选取的遥感影像为2000年7月6日Landsat ETM+、2009年7月31日Landsat ETM+和2021年7月24日Landsat OLI共3期影像,云量低于20%且与实地采样时间最为接近,数据间隔控制在10 a左右,保持一定的逻辑;数字高程DEM数据来自于地理空间数据云(https://www.gscloud.cn)。

预处理:

(1)遥感影像(ENVI 5.3软件):Radiometric Calibration、QUAC、Seamless Mosaic、边界裁剪。

(2)地面调查数据(ArcGIS 10.6):Add Data工具添加坐标点,Extraction Values to Points模型构建。

(3)数字高程数据(ArcGIS 10.6):拼接、边界裁剪和格式转换。

1.3 统计学方法

1.3.1 回归分析 回归分析(Regression)是一种试图以一个或多个自变量来解释另一个因变量的统计方法,在非线性回归模型中,一种类型是可以通过变量变换,化为线性模型进行分析,即曲线回归(曲线拟合),一般形式为:

$$y_i = f(x,\theta) + e_i \tag{1}$$

式中:y_i为因变量(被解释变量);$f(x,\theta)$为参数估计方程;e_i为误差的函数,拟合后取最小值。

1.3.2 Min-Max标准化 由于不同的数据有不同的量纲,而进行综合指标构建时需要有统一的标准,因此需要对数据首先进行标准化处理。数据标准化可以消除不同数据之间不同量纲的影响,解决数据不匹配的问题,常用的标准化方法有Min-Max标准化(Min-Max Normalization)[17]、z-score标准化方法等,考虑数据量和数据处理的便捷性,本研究采用的方法为Min-Max标准化方法,标准化处理之后数据在[-1,1]范围内。

$$X_* = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \tag{2}$$

式中:X_*为归一化处理后的数据;X为原始数据;$X_{\min}$为数据的最小值;$X_{\max}$为数据的最大值。

1.3.3 主成分分析法 指标权重常用的确定方法有专家打分法[14]、主成分分析法[18]、聚类分析法[19]等。但专家打分法掺杂了太多的主观意识,主成分分析(Principal Component Analysis,PCA),是一种通过正交变换将一组存在相关性的变量转换为一组线性不相关变量的数学统计方法,将数据的大部分信息以贡献程度靠前的变量集中表示。已有多项学者的研究表明,主成分分析法应用于草地退化分指标的权重确定具有一定的科学性和准确性[20-21]。

1.3.4 精度评价 GDI模型的精度采用验证点位的遥感拟合值与地面点位实际计算值的均方根误差结果来进行衡量,均方根误差(RMSE)是用来衡量观测值同真值之间的偏差,RMSE对相差较大的数据相关性更高,所以其针对异常值更为敏感,计算公式为:

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\mathrm{GDI_g} - \mathrm{GDI_{rs}}\right)^2} \tag{3}$$

式中:RMSE表示均方根误差;n表示样本的个数;$\mathrm{GDI_g}$表示地面调查点位实际计算值;$\mathrm{GDI_{rs}}$表示遥感拟合值。在用于评价反演模型的精度时,RMSE值越小表示模型的精度越好。

1.4 草原退化分级方法

1.4.1 植被指数 归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index,NDVI)是应用最广泛的植被指数,可以有效反映植被状况,且计算简单,研究也最深入[22]。此外,本文又引入了其他植被指数,差值植被指数(Difference Vegetation Index,DVI)、比值植被指数(Ratio Vegetation Index,RVI)、增强型植被指数(Enhanced vegetation index,EVI)、土壤植被指数(Soil-Adjusted Vegetation Index,SAVI)(表1),并给出其计算公式。

1.4.2 草地退化指数(GDI) 草地退化指数(Grassland Degradation Index,GDI)是大尺度上用于评价草

表1 植被指数及计算公式

Tab. 1 Vegetation index and calculation formula

植被指数	计算公式	参考文献
归一化植被指数	$\mathrm{NDVI} = \frac{R_{\mathrm{Nir}} - R_{\mathrm{Red}}}{R_{\mathrm{Nir}} + R_{\mathrm{Red}}}$	[23]
差值植被指数	$\mathrm{DVI} = R_{\mathrm{Nir}} - R_{\mathrm{Red}}$	[24]
比值植被指数	$\mathrm{RVI} = \frac{R_{\mathrm{Nir}}}{R_{\mathrm{Red}}}$	[25]
增强型植被指数	$\mathrm{EVI} = 2.5 \times \frac{R_{\mathrm{Nir}} - R_{\mathrm{Red}}}{R_{\mathrm{Nir}} + 6.0R_{\mathrm{Red}} - 7.5R_{\mathrm{Blue}} + 1}$	[26]
土壤植被指数	$\mathrm{SAVI} = \frac{R_{\mathrm{Nir}} - R_{\mathrm{Red}}}{R_{\mathrm{Nir}} + R_{\mathrm{Red}} + L}(1+L)$	[27]
三波段梯度差植被指数	$\begin{cases}\mathrm{TGDVI} = \frac{R_{\mathrm{Nir}} - R_{\mathrm{Red}}}{\lambda_{\mathrm{Nir}} - \lambda_{\mathrm{Red}}} - \frac{R_{\mathrm{Red}} - R_{\mathrm{Green}}}{\lambda_{\mathrm{Red}} - \lambda_{\mathrm{Green}}} \\ \text{若TGDVI} < 0,\ \text{则TGDVI} = 0\end{cases}$	[28]

注:R_{Nir}表示近红外波段;R_{Red}表示红色波段;R_{Blue}表示蓝色波段;R_{Green}表示绿色波段;λ_{Nir}表示近红外波段的波长;λ_{Red}表示红外波段的波长;λ_{Green}表示绿色波段的波长;L为土壤调节系数,L=0.5。

原退化程度的常用指标[15]。本文草地退化指数是植被覆盖度、总产草量和草层平均高度3个因子的加权综合，是草原植被状况的数字化表示，取值范围为0~1，计算公式为：

$$GDI_g = \sum_{i=1}^{n} v_i w_i \tag{4}$$

式中：GDI_g 表示地面调查点位草地退化指数；n 表示指标的个数；v_i 表示 i 指标的标准化值；w_i 表示 i 指标的分权重。

1.4.3　草原退化分级标准　以1986年草原样方调查资料作为未退化参照标准，根据《天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标》（GB 19377-2003）[29]和前人的研究[21]，参考了植被覆盖度减少率（未退化<10%、轻度退化11%~20%、中度退化21%~30%、重度退化>30%），草层平均高度减少率（未退化<10%、轻度退化11%~20%、中度退化21%~50%、重度退化>50%）和总产草量减少率（未退化<10%、轻度退化11%~20%、中度退化21%~50%、重度退化>50%）的单指标分级阈值，加权平均得到了综合指标草地退化指数的分级阈值，将研究区草原退化程度分为4个等级：未退化（GDI的减少率<10%）、轻度退化（GDI的减少率为10%~20%）、中度退化（GDI的减少率为20%~40.8%）、重度退化（GDI的减少率>40.8%）。

2　结果与分析

2.1　20世纪80年代草地退化指数的计算结果

草原退化的参考基准值根据20世纪80年代草原普查数据确定，新疆天山巴音布鲁克草原分为高寒草甸类、高寒草原类、沼泽草地类3种草地类，地表植被包含19种植物（表2）。

表2　主要植物种类

Tab. 2　Main plant species

草地类	植物种类
高寒草甸类	白尖薹草（*Carex oxyleuca*）
	鬼箭锦鸡儿（*Caragana jubata*）
	线叶嵩草（*Kobresia capillifolia*）
	细果薹草（*Carex stenocarpa*）
	珠芽蓼（*Polygonum viviparum*）
高寒草原类	新疆薹草（*Carex turkestanica*）
	溚草（*Koeleria macrantha*）
	寒生羊茅（*Festuca kryloviana*）
	宽穗赖草（*Leymus ovatus*）
	冰草（*Agropyron cristatum*）
	天山鸢尾（*Iris loczyi Kanitz*）
	紫花针茅（*Stipa purpurea*）
	椒蒿（*Artemisia dracunculus*）
	野黑麦（*Secale sylvestre*）
	冷蒿（*Artemisia frigida*）
	座花针茅（*Stipa subsessiliflora*）
沼泽草地类	柄囊薹草（*Carex stenophylla*）
	布顿大麦草（*Hordeum bogdanii*）
	扁灯芯草（*Juncus compressus*）

结合遥感影像和野外实测样地精细划分29个草地类型，计算20世纪80年代草原普查数据形成了退化背景的 GDI_g 参考值（表3）。GDI_g 最大值出现在高寒草甸类的线叶嵩草、杂类草类型，表明该类型植被状况最好，GDI_g 最小值出现在高寒草原类寒生羊茅、冰草，该类型植被状态最差，整体来看，高寒草甸类和沼泽类植被要好于高寒草原类。

2.2　2021年草地退化指数的计算结果

2021年地面调查点位的70%作为建模集样本，共35个样地点位，即高寒草甸类样本点6个，高寒草原类样本点24个，沼泽类样本点5个（表4），采样时间为7月10—31日，植被覆盖度主要通过目视估测法得到，每个样地包含3个1 m×1 m的小样方，通过刈割法获取总产草量鲜重，草层平均高度是样地内多个物种的高度平均值。

2.3　草地退化指数的遥感模型

将归一化处理后的植被覆盖度、草层平均高度、总产草量3个变量通过SPSS提取出1个主成分，通过成分矩阵和分指标的方差贡献率计算得到综合得分模型中的系数（表5），最后对其进行归一化处理和求平均值。

植被覆盖度、草层平均高度、总产草量的权重分别为：0.46、0.30和0.24（表5）。草地退化指数 GDI_g 计算公式如下：

$$GDI_g = 0.46 \times C_i + 0.30 \times H_i + 0.24 \times Y_i \tag{5}$$

式中：GDI_g 表示地面调查点位的草地退化指数；C_i 表示 i 群落标准化的植被覆盖度；H_i 表示 i 群落标准化的草层平均高度；Y_i 表示 i 群落标准化的总产草量。

建模样地 GDI_g 与6种植被指数相关性最高的为NDVI，皮尔逊相关性系数为0.743，sig<0.01，在

表3 20世纪80年代草原普查数据集

Tab. 3 Grassland census data set in 1980s

草地类	草地型	平均盖度/%	总产草量/(kg·hm⁻²)	平均高度/cm	GDI_g
高寒草甸类	白尖薹草、杂类草	85	3108.00	14.0	0.52
	鬼箭锦鸡儿、线叶嵩草、杂类草	90	3199.50	25.0	0.78
	线叶嵩草	90	3237.00	20.0	0.68
	线叶嵩草、白尖薹草、杂类草	90	3031.50	20.0	0.68
	线叶嵩草、细果薹草、珠芽蓼	90	6631.50	17.5	0.75
	线叶嵩草、杂类草	90	7485.00	25.0	0.93
	珠芽蓼、细果薹草、杂类草	90	3247.50	12.5	0.53
高寒草原类	新疆薹草、溚草	60	1546.50	16.5	0.34
	新疆薹草、寒生羊茅	65	2173.50	15.0	0.37
	新疆薹草、宽穗赖草	40	5620.50	12.5	0.26
	新疆薹草、杂类草	60	4480.50	20.0	0.51
	寒生羊茅、冰草	50	1705.50	10.0	0.15
	寒生羊茅、新疆薹草、天山鸢尾	85	1770.00	15.0	0.50
	寒生羊茅、紫花针茅	50	1827.00	12.5	0.20
	宽穗赖草	35	1380.60	20.0	0.23
	宽穗赖草、椒蒿	35	1380.60	20.0	0.23
	天山鸢尾、新疆薹草、紫花针茅	85	1914.00	17.5	0.55
	天山鸢尾、寒生羊茅	85	1914.00	17.5	0.55
	野黑麦、杂类草	85	5319.00	22.5	0.77
	紫花针茅、冰草、杂类草	50	498.00	12.5	0.16
	紫花针茅、新疆薹草	50	951.00	17.5	0.27
	紫花针茅、新疆薹草、寒生羊茅	50	1827.00	12.5	0.20
	紫花针茅、寒生羊茅、冰草	50	1827.00	12.5	0.20
	紫花针茅、宽穗赖草	50	951.00	17.5	0.27
	紫花针茅、冷蒿	45	913.50	17.5	0.24
	紫花针茅、杂类草	50	951.00	17.5	0.27
	座花针茅、宽穗赖草	50	1380.60	20.0	0.34
沼泽草地类	柄囊薹草	100	4128.00	17.5	0.73
	布顿大麦草、扁灯芯草	100	4323.00	12.5	0.64

0.01水平上相关性显著，优于DVI的0.694**、RVI的0.568**、EVI的0.642**、SAVI的0.637**及TGDVI的−0.435**，其中，*代表在0.05级别(双尾)相关性显著，**在0.01级别(双尾)相关性显著。在GDI_g为因变量NDVI为自变量的5种回归模型(线性、指数、对数、二次、幂函数)中，线性函数模型显示出了最佳拟合($R^2=0.553$)。草地退化指数GDI_{rs}的计算方程如下所示：

$$GDI_{rs}=0.830\times NDVI_{2021}+0.086 \quad (R^2=0.553, RMSE=0.145) \tag{6}$$

式中：GDI_{rs}表示草地退化指数的遥感拟合值；$NDVI_{2021}$表示2021年的NDVI值。

为了测试GDI_{rs}回归模型遥感拟合值的准确性，采用剩余30%的样地点位(17个样地点位)用于模型精度验证，GDI_g与GDI_{rs}之间RMSE为0.140，RMSE值较小，说明反演模型精度较高，可用于草原退化程度评价。

2.4 巴音布鲁克草原的退化现状

相比于20世纪80年代，2021年巴音布鲁克草原退化分级以未退化为主，未退化面积占总面积的比例为60.51%，退化面积占总面积的比例为39.49%，其中重度退化面积、中度退化面积和轻度退化面积分别占总面积的比例为14.71%、12.55%和12.23%。

在3种草地类型中，高寒草甸类草地面积最大。高寒草甸类重度退化面积占该类草地总面积

表4　2021年建模样地数据集

Tab. 4　Data set of construction points in 2021

样地号	平均盖度/%	总产草量/(kg·hm^{-2})	平均高度/cm	GDI_g
001	75	3560.00	15.0	0.56
002	95	4336.00	15.0	0.70
003	100	6387.00	20.0	0.85
004	94	2013.00	6.0	0.52
005	100	10233.00	18.0	0.84
006	80	2263.33	7.0	0.46
007	84	2506.00	31.0	0.72
008	82	2586.00	12.0	0.53
009	60	1933.00	12.0	0.38
010	100	1870.00	12.0	0.61
011	70	1703.00	12.0	0.43
012	70	2503.00	22.0	0.56
013	50	2556.00	23.0	0.45
014	88	3566.00	27.0	0.74
015	80	1817.00	16.0	0.53
016	75	2460.00	15.0	0.52
017	65	1403.33	5.7	0.33
018	55	1160.00	5.3	0.26
019	65	776.67	4.0	0.29
020	75	2070.00	8.7	0.44
021	55	1210.00	5.0	0.26
022	55	520.00	3.7	0.22
023	90	2393.33	7.7	0.53
024	40	703.33	4.0	0.15
025	85	1576.67	8.3	0.48
026	40	710.00	4.3	0.15
027	41	1980.00	6.4	0.22
028	40	979.50	7.6	0.19
029	34	960.00	9.6	0.18
030	44	864.00	4.7	0.18
031	92	6853.00	34.0	0.95
032	95	2660.00	19.0	0.67
033	95	3240.00	9.7	0.61
034	84	2482.50	13.0	0.55
035	83	3720.00	11.5	0.57

表5　指标权重系数

Tab. 5　Index weight coefficient

	植被覆盖度	草层平均高度	总产草量
20世纪80年代模型系数	0.59	0.36	0.30
2021年模型系数	0.59	0.44	0.32
20世纪80年代指标权重	0.47	0.29	0.24
2021年指标权重	0.44	0.32	0.24
权重平均值	0.46	0.30	0.24

的比例为21.19%,大于高寒草原类的0.67%和沼泽草地类的14.39%,高寒草原类未退化面积占该类草地总面积的91.54%,大于高寒草甸类的49.06%和沼泽草地类的41.61%。高寒草甸类草地退化现状比高寒草原类和沼泽类更为严重,高寒草原类草地植被退化状况最轻。

由于巴音布鲁克草原山间盆地地形特殊,海拔相差大,草地主要集中分布在2347~2663 m、2663~2980 m、2980~3322 m的3个海拔梯度内(图2)。1624~2347 m、3698~4606 m海拔梯度内重度退化草地面积占该梯度草地总面积的比例分别为63.03%、57.32%,山地和平原地区草地退化现状严重;2347~2663 m、2663~2980 m海拔梯度内未退化草地面积占该梯度草地总面积的比例为75.03%、73.40%,中高海拔地区尤其是盆地内草地退化状况较轻。

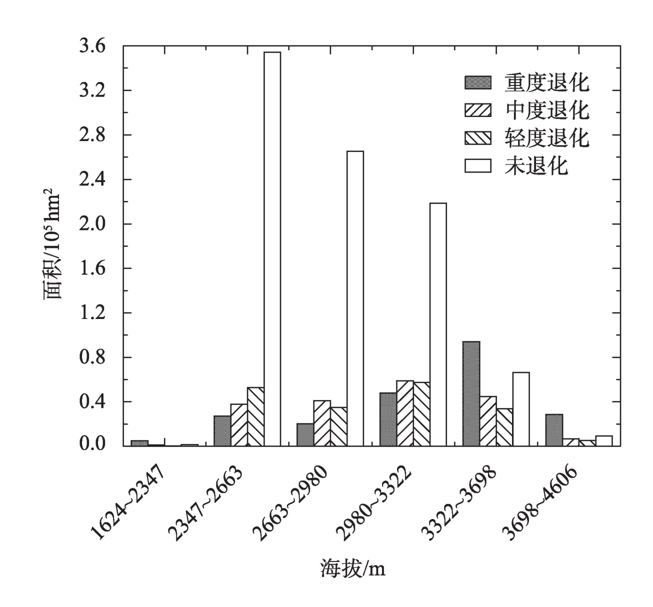


图2　不同海拔梯度退化面积

Fig. 2　Degradation area map of different altitude gradients

2.5　GDI模型的草原退化评价应用

GDI_{rs}模型可以应用于前期年份的草原退化程度评价,由于缺乏历史年份的地面调查数据,又不能将2021年GDI_{rs}模型直接应用于其他年份,故需要通过2021年NDVI值对2000年、2009年的NDVI值做辐射配准,提取2021年52个样地点位对应的2000年、2009年和2021年的NDVI值,通过SPSS 25.0完成回归分析获得辐射配准模型。

$$NDVI_{2021} = 0.901 \times NDVI_{2000} - 0.014 \quad (R^2 = 0.682, RMSE = 0.104) \qquad (7)$$

表6 2000年、2009年和2021年草原退化情况

Tab. 6 Vegetation degradation in 2000, 2009 and 2021

退化程度	1986—2000年面积/hm²	1986—2000年比例/%	1986—2009年面积/hm²	1986—2009年比例/%	1986—2021年面积/hm²	1986—2021年比例/%
重度退化	247967.37	16.47	163884.51	10.89	221458.95	14.71
中度退化	431370.63	28.66	193017.06	12.82	188894.07	12.55
轻度退化	243514.08	16.18	177344.28	11.78	184102.11	12.23
未退化	582457.77	38.69	971064.00	64.51	910854.72	60.51

$$NDVI_{2021} = 0.922 \times NDVI_{2009} + 0.070 \quad (R^2 = 0.680, RMSE = 0.104) \tag{8}$$

根据公式(7)、公式(8)对2000年和2009年NDVI值进行波段运算,将计算结果代入公式(6)计算2 a的GDI_{rs}值,最后通过GDI_{rs}的变化率分级确定2000年和2009年草原退化程度,评价近20 a的草原退化变化特征。

通过2000年、2009年和2021年3期退化结果明显看出(表6),2000年以来,巴音布鲁克退化情况有了一定的改善,2000—2009年重度退化、中度退化和轻度退化面积占总面积的比例分别下降了5.58%、15.84%、4.4%,未退化面积占总面积的比例增加了25.82%,退化情况得到了明显的改善;2009—2021年变化幅度不大,重度退化、轻度退化面积占总面积的比例提高了3.82%、0.45%,中度退化的面积占总面积的比例下降了0.27%,未退化面积占总面积的比例降低了4%,草原退化程度有轻微波动,但未退化面积仍大于退化面积。

3 讨 论

巴音布鲁克草原海拔较高,通过遥感手段监测时难以找到无云干扰的多期影像,长时间序列研究比较困难,本文尽量保证了每10 a评估1次的逻辑性。与其他学者草地退化遥感评估的区别在于本文形成了20世纪80年代草原背景值,以GDI_{rs}的变化率来表征了退化程度。目前存在3点问题需要深入讨论:

3.1 草原退化遥感评估的误差分析

本研究中GDI_{rs}模型拟合度为0.553,相关性一般,主要有3个方面的原因导致:(1)由于巴音布鲁克遥感影像云量较大,选择和地面采样点时间最为接近的Landsat数据,二者之间仍然存在时间异质性,时间上不能做到完全匹配;(2)Landsat影像分辨率为30 m,但样方为1 m×1 m,空间异质性会导致草原退化评估结果产生误差;(3)样方点位过少,过拟合现象会导致评估结果产生误差。针对草原退化的本底参照系统,以评价指标的最大值[30]或平均值作为理想样地参数也是一种重要思路,但会有退化评估程度过低的问题,还有学者选取起始年份作为背景值[31],但起始年份草原的退化情况难以准确把握。为了更接近草原未退化实际情况,本研究的巴音布鲁克参照系统按照20世纪80年代草地类型大类赋值,将退化背景值控制在合适范围内。

3.2 GDI模型草原退化评估的适用性

目前,应用于草地生态系统的遥感应用研究中,存在定量反演精度不高的问题[32],本文构建的GDI模型可以解决草原退化定量评估的科学问题;并且通过辐射配准可以完成GDI模型在前期年份的应用,填补由于历史数据缺失导致连续时间序列研究的空白,时间尺度上模型更具优势,可以用于指导草原生态系统保护的数据基础,对于长时间序列草原退化评估该模型普适性更高。并且通过引入权重可以实现多指标的综合,提高遥感草原退化评估的效率,满足草原生态系统管理的应用需要。

2000年未退化面积占总面积的比例为38.69%,2009年未退化面积占总面积的比例为64.51%,2021年未退化面积占总面积的比例为60.51%,本文结果与焦阿永等[33]通过NDVI值计算得出的2000—2019年北疆地区草地覆盖显著增加的结论相符;但其中2000—2009年草原退化程度相差较大,新疆草地植被-净初级生产力与降水呈正相关关系[34],通过辐射配准方法完成前期年份的草原退化评估存在气象背景值不统一的误差,优先完成研究区不同降水年份的分类,可以提高模型的精度[35],后期工作需要把巴音布鲁克草原分为降水平年、涝年和旱年,比较相同降水背景下的草原变化情况。

3.3 草原退化的影响因素

植被长势好坏与气候因素密切相关,Fu等[36]研究显示,1961—2009年新疆天山开都河流域气温以0.167 ℃·(10a)$^{-1}$的趋势增加,降水以0.167 ℃·(10a)$^{-1}$的趋势增加;刘濛濛等[37]对巴音布鲁克气候的研究结果表明,20世纪90年代中期以后,巴音布鲁克气温升高、降水增多,因此本文研究时间段内的1986—2015年巴音布鲁克草原气候总体呈现"暖湿化";Gang等[34]研究表明,新疆1981—2010年的草地NPP同降水和气温呈正相关关系,巴音布鲁克草原温度回暖和降水增加趋势使得当地草地植被得以恢复,这与赵鹏等[38]研究发现,1982—2015年气候要素导致新疆草地NPP增加的结果相似,与本文研究得出2000—2009年草原退化程度明显改善的结果相符,而对于2009—2021年草原退化程度轻微波动的结果,姚俊强等[39]研究结果指出,20世纪90年代之后新疆气候多呈暖湿配置,但在2022年时段内有所减缓,"暖湿化"趋势减缓导致了2021年草原植被状态的非线性增加结果。此外,人类活动对草原的影响复杂多变,曹永香等[40]通过主成分分析法研究发现,人类活动是策勒绿洲-沙漠过渡带植被变化的主导影响因素。除了牲畜量的增加导致草原退化外,退牧还草工程下的围栏封育、季节性休牧、划区轮牧、牧草补播等[41]是目前人类保护草原生态的主要措施,人类活动在草原退化程度改善中起到了多大的作用需要选取合适的科学方法进一步分析。

4 结 论

本文通过构建GDI_{rs}模型和Landsat影像对巴音布鲁克草原多年退化程度进行评价,提高了草原退化遥感监测效率,主要结论有:

(1)GDI_g综合指标为植被覆盖度、草层平均高度、总产草量的加权平均,引入该指标可以提高草原退化遥感评价的效率;GDI_g与NDVI的相关性最好,且GDI_{rs}模型方程的拟合度为0.553,RMSE为0.140,适用于巴音布鲁克草原退化程度遥感评估。

(2)2021年巴音布鲁克草原未退化面积占总面积的比例为60.51%,高寒草甸类草地退化最严重,高寒草原类草地退化状况最轻,空间分布上表现为由盆地向山地退化加重的趋势。

(3)利用辐射配准方法对前期年份草原退化程度进行评估,研究的时间尺度更长,结果表明2000—2009年巴音布鲁克草原退化程度明显改善,2009—2021年草原退化程度轻微波动。

参考文献(References):

[1] 张新时, 唐海萍, 董孝斌, 等. 中国草原的困境及其转型[J]. 科学通报, 2016, 61(2): 165-177. [Zhang Xinshi, Tang Haiping, Dong Xiaobin, et al. The dilemma of steppe and it's transformation in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(2): 165-177.]

[2] 沈海花, 朱言坤, 赵霞, 等. 中国草地资源的现状分析[J]. 科学通报, 2016, 61(2): 139-154. [Shen Haihua, Zhu Yankun, Zhao Xia, et al. Analysis of current grassland resources in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(2): 139-154.]

[3] 杨红飞, 刚成诚, 穆少杰, 等. 近10年新疆草地生态系统净初级生产力及其时空格局变化研究[J]. 草业学报, 2014, 23(3): 39-50. [Yang Hongfei, Gang Chengcheng, Mu Shaojie, et al. Analysis of the spatio-temporal variation in net primary productivity of grassland during the past 10 years in Xinjiang[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(3): 39-50.]

[4] 迪利夏提·哈斯木. 新疆草地资源现状与生态保护[J]. 新疆环境保护, 2013, 35(S1): 41-44. [Dilixiati Hasimu. Current situation and ecological protection of grassland resources in Xinjiang[J]. Environmental Protection of Xinjiang, 2013, 35(S1): 41-44.]

[5] 李文利, 何文革. 新疆巴音布鲁克草原退化及其驱动力分析[J]. 青海草业, 2008, 17(2): 44-47. [Li Wenli, He Wenge. The analysis on driven forces of degradation of Bayinbulake grassland in Xinjiang[J]. Qinghai Prataculture, 2008, 17(2): 44-47.]

[6] 张海燕, 樊江文, 邵全琴. 2000—2010年中国退牧还草工程区土地利用/覆被变化[J]. 地理科学进展, 2015, 34(7): 840-853. [Zhang Haiyan, Fan Jiangwen, Shao Quanqin. Land use/land cover change in the grassland restoration program areas in China, 2000-2010[J]. Progress in Geography, 2015, 34(7): 840-853.]

[7] 仇焕广, 张崇尚, 刘乐, 等. 我国草原管理制度演变及社区治理机制创新[J]. 经济社会体制比较, 2020(3): 48-56. [Qiu Huanguang, Zhang Chongshang, Liu Le, et al. Evolution of grassland management institutions and innovation of the local governance mechanism in China[J]. Comparative Economic & Social Systems, 2020(3): 48-56.]

[8] Zhou Wei, Yang Han, Huang Lu, et al. Grassland degradation remote sensing monitoring and driving factors quantitative assessment in China from 1982 to 2010[J]. Ecological Indicators, 2017, 83: 303-313.

[9] 吴晓全, 王让会, 李成, 等. 天山植被NPP时空特征及其对气候要素的响应[J]. 生态环境学报, 2016, 25(11): 1848-1855. [Wu Xiaoquan, Wang ranghui, Li Cheng, et al. Spatial-temporal characteristics of NPP and its response to climatic factors in Tianshan Mountains region[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016,

25(11): 1848-1855.]

[10] 杜自强, 王建, 李建龙, 等. 黑河中上游典型地区草地植被退化遥感动态监测[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 180-185. [Du Ziqiang, Wang Jian, Li Jianlong, et al. Remote sensing-based monitor dynamically grassland degradation in typical regions, middle and upper reaches of Heihe River Basin, western China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(4): 180-185.]

[11] 赵玉婷, 李文龙, 陈迪, 等. 高寒牧区草地生态系统健康动态评价——以甘南地区为例[J]. 草业科学, 2017, 34(1): 16-29. [Zhao Yuting, Li Wenlong, Chen Di, et al. Dynamic assessment of alpine pasture grassland ecosystem health: A case study from the Gannan region[J]. Pratacultural Science, 2017, 34(1): 16-29.]

[12] 陆均, 胡玉昆, 岳平, 等. 基于CVOR指数的巴音布鲁克高寒草原健康评价[J]. 干旱区研究, 2017, 34(4): 862-869. [Lu Jun, Hu Yukun, Yue Ping, et al. Assessment on the health of alpine steppe in Bayinbuluk based on CVOR index[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(4): 862-869.]

[13] 吴志丰, 李芬, 张林波, 等. 三江源区草地参照覆盖度提取及草地退化研究[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(2): 94-102. [Wu Zhifeng, Li Fen, Zhang Linbo, et al. Research on grassland degradation of Three-River headwaters region based on reference vegetation coverage[J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(2): 94-102.]

[14] 李霞, 潘冬荣, 孙斌, 等. 甘肃省草地退化概况分析——基于甘肃省第一、二次草原普查数据[J]. 草业科学, 2022, 39(3): 485-494. [Li Xia, Pan Dongrong, Sun Bin, et al. Analysis of grassland degradation in Gansu Province based on two grassland surveys[J]. Pratacultural Science, 2022, 39(3): 485-494.]

[15] Yang Yanlin, Wang Jinliang, Chen Yun, et al. Remote-sensing monitoring of grassland degradation based on the GDI in Shangri-La, China[J]. Remote Sensing, 2019, 11(24): 3030.

[16] 公延明, 胡玉昆, 阿德力·麦地, 等. 巴音布鲁克高寒草地退化演替阶段植物群落特性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(6): 149-152. [Gong Yanming, Hu Yukun, Adeli Maidi, et al Alpine grassland community characteristics at the different stages of degenerating succession in Bayanbulak[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(6): 149-152.]

[17] Choi Jaewon, Oh Hyun-Joo, Won Joong-Sun, et al. Validation of an artificial neural network model for landslide susceptibility mapping [J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 60(3): 473-483.

[18] 张雨斯, 包玉海, 贺忠华. 1990—2021年内蒙古遥感生态环境质量变化及趋势分析——以呼伦贝尔市陈巴尔虎旗为例[J]. 干旱区研究, 2023, 40(2): 326-336. [Zhang Yusi, Bao Yuhai, He Zhonghua. Detecting the change and trend of remote sensing ecological quality in Inner Mongolia from 1990-2021: A case study of Chenbarhu Banner of Hulunbuir City[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(2): 326-336.]

[19] 冯双双. 基于Landsat影像的草地退化动态监测[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2016. [Feng Shuangshuang. Dynamic Monitoring of Grassland Degradation Based on Landsat Image[D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2016.]

[20] Lyu Xin, Li Xiaobing, Gong Jirui, et al. Comprehensive grassland degradation monitoring by remote sensing in Xilinhot, Inner Mongolia, China[J]. Sustainability, 2020, 12(9): 3682.

[21] 徐剑波, 宋立生, 赵之重, 等. 近15 a来黄河源地区玛多县草地植被退化的遥感动态监测[J]. 干旱区地理, 2012, 35(4): 615-622. [Xu Jianbo, Song Lisheng, Zhao Zhizhong, et al. Monitoring grassland degradation dynamically at Maduo County in source region of Yellow River in past 15 years based on remote sensing[J]. Arid Land Geography, 2012, 35(4): 615-622.]

[22] Li Lanhui, Zhang Yili, Liu Linshan, et al. Spatiotemporal patterns of vegetation greenness change and associated climatic and anthropogenic drivers on the Tibetan Plateau during 2000-2015[J]. Remote Sensing, 2018, 10(10): 1525.

[23] Tucker J Compton. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation[J]. Remote Sensing of Environment, 1979, 8(2): 127-150.

[24] Richardson A J, Wiegand C L. Distinguishing vegetation from soil background information[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1977, 43(12): 1541-1552.

[25] Jordan C F. Derivation of leaf area index from light quality of the forest floor[J]. Ecology, 1969, 50(4): 663-666.

[26] Liu Jiangui, Shang Jiali, Qian Budong, et al. Crop yield estimation using time-series MODIS data and the effects of cropland masks in Ontario, Canada[J]. Remote Sensing, 2019, 11(20): 2419.

[27] Huete A R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI)[J]. Remote Sensing of Environment, 1988, 25(3): 295-309.

[28] 唐世浩, 朱启疆, 王锦地, 等. 三波段梯度差植被指数的理论基础及其应用[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2003, 33(11): 1094-1102. [Tang Shihao, Zhu Qijiang, Wang Jindi, et al. Theoretical basis and application of three band gradient difference vegetation index[J]. Chinese Science (Series D: Earth Science), 2003, 33(11): 1094-1102.]

[29] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 19377-2003. 天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标[S]. 2003. [General Administration of Quality Supervision. GB 19377-2003. Parameters for Degradation, Sandification and Salification of Rangeland[S]. 2003.]

[30] 曹旭娟, 干珠扎布, 梁艳, 等. 基于NDVI的藏北地区草地退化时空分布特征分析[J]. 草业学报, 2016, 25(3): 1-8. [Cao Xujuan, Ganzhu Zhabu, Liang Yan, et al. Temporal and spatial distribution of grassland degradation in northern Tibet based on NDVI [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(3): 1-8.]

[31] 李莉, 李峰. 基于RS和GIS的四川草地退化分析[J]. 中国农学通报, 2017, 33(17): 87-91. [Li Li, Li Feng. Grassland degradation analysis in Sichuan based on RS and GIS[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(17): 87-91.]

[32] 朱宁, 王浩, 宁晓刚, 等. 草地退化遥感监测研究进展[J]. 测绘科

学, 2021, 46(5): 66–76. [Zhu Ning, Wang Hao, Ning Xiaogang, et al. Advances in remote sensing monitoring of grassland degradation[J]. Science of Surveying and Mapping, 2021, 46(5): 66–76.]

[33] 焦阿永, 陈伏龙, 闫俊杰, 等. 北疆地区草地TI-NDVI与NDVImax时空异质性评价[J]. 干旱区研究, 2022, 39(4): 1155–1165. [Jiao Ayong, Chen Fulong, Yan Junjie, et al. Spatio-temporal heterogeneity evaluation of grassland TI- NDVI and NDVImax in northern Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(4): 1155–1165.]

[34] Gang C, Zhou W, Wang Z, et al. Comparative assessment of grassland NPP dynamics in response to climate change in China, North America, Europe and Australia from 1981 to 2010[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2015, 201(1): 57–68.

[35] 张文博. 基于MODIS数据的草地退化遥感监测方法研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020. [Zhang Wenbo. Research on Remote Sensing Monitoring Method of Grassland Degradation Using MODIS Data[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020.]

[36] Fu Aihong, Chen Yaying, Li Weihong, et al. Spatial and temporal patterns of climate variations in the Kaidu River Basin of Xinjiang, Northwest China[J]. Quaternary International, 2013, 311: 117–122.

[37] 刘濛濛, 隆永兰. 巴音布鲁克近58 a气候变化特征分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(4): 715–723. [Liu Mengmeng, Long Yonglan. Climatic variation characteristics in Bayinbuluk during the past 58 years[J]. Arid Land Geography, 2019, 365 42(4): 715–723.]

[38] 赵鹏, 陈桃, 王茜, 等. 气候变化和人类活动对新疆草地生态系统NPP影响的定量分析[J]. 中国科学院大学学报, 2020, 37(1): 51–62. [Zhao Peng, Chen Tao, Wang Qian, et al. Quantitative analysis of the impact of climate change and human activities on grassland ecosystem NPP in Xinjiang[J]. Journal of university of Chinese Academy of Sciences, 2020, 37(1): 51–62.]

[39] 姚俊强, 李漠岩, 迪丽努尔·托列吾别克, 等. 不同时间尺度下新疆气候"暖湿化"特征[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 333–346. [Yao Junqiang, Li Moyan, Dilinuer Tuoliewubieke, et al. The assessment on "warming- wetting" trend in Xinjiang at multi- scale during 1961– 2019[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 333–346.]

[40] 曹永香, 毛东雷, 薛杰, 等. 绿洲–沙漠过渡带植被覆盖动态变化及其驱动因素——以新疆策勒为例[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 510–521. [Cao Yongxiang, Mao Donglei, Xue Jie, et al. Dynamic changes and driving factors of vegetation cover in the oasis-desert ecotone: A case study of Cele, Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 510–521.]

[41] 潘庆民, 薛建国, 陶金, 等. 中国北方草原退化现状与恢复技术[J]. 科学通报, 2018, 63(17): 1642–1650. [Pan Qingmin, Xue Jianguo, Tao Jin, et al. Current status of grassland degradation and measures for grassland restoration in northern China[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(17): 1642–1650.]

Evaluation of the degree of degradation of Xinjiang Tianshan Bayinbuluk grassland in 35 years

ZHAO Jian[1,2,3], DENG Chengjun[4], LI Wenli[4], ZHAO Jin[1],
GONG Yanming[1,2], LI Kaihui[1,2]

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. Bayinbuluk Grassland Ecosystem Research, Xinjiang Institute of Ecology and Geography Chinese Academy of Sciences, Bayinbuluk 841314, Xinjiang, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Grassland Workstation of Bayinguoleng Mongol Autonomous Prefecture, Kuerle 841000, Xinjiang, China)

Abstract: Many studies on grassland ecosystem degradation have been performed using vegetation coverage or productivity indexes for evaluation. However, it is difficult to comprehensively evaluate different degrees of grassland degradation using a single evaluation index. Taking Bayinbuluk grassland in the Xinjiang Tianshan Mountains as a research object, a remote sensing method for evaluating grassland degradation based on standardized processing sub-index coupling was proposed. The grassland vegetation coverage, average grass layer height, and total grass yield were selected to determine the weight of the three indexes by principal component analysis. The Min-Max standardized method was introduced to construct the grassland degradation index (GDI). Finally, the degree of degradation of Bayinbuluk grassland in the Xinjiang Tianshan Mountains was determined through Landsat image inversion and reasonable classification of the rate of change of grassland degradation index from 1986 to 2021. The results showed that GDI_g has the best correlation with NDVI. In 2021, the proportion of undegraded area of Bayinbuluk grassland relative to the total area was 60.51%. The degree of degradation of different grassland types showed clear differences. The spatial distribution showed a trend of basin to mountain degradation. The GDI_{rs} model could be applied to other years through the radiation registration method. The degree of degradation of Bayinbuluk grassland significantly improved from 2000 to 2009 and slightly fluctuated from 2009 to 2021. The results of this research provide robust data support and a theoretical basis for guiding evaluation of the degree of degradation of Bayinbuluk grassland and protecting the grassland ecosystem.

Keywords: grassland degradation; Landsat image; Min-Max standardization; grassland degradation index; regression model; Bayinbuluk grassland